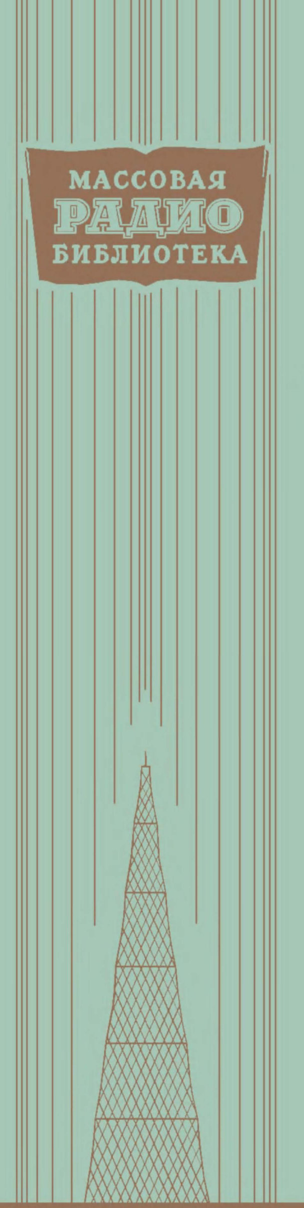
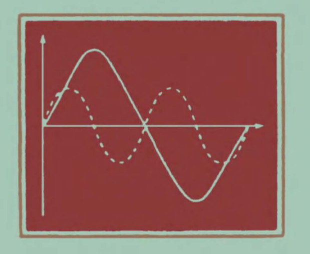


И. Х. РИЗКИН

ДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1956

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 245

И. Х. РИЗКИН

ДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

В брошюре описан принцип действия делителей частоты синусоидальных колебаний. Рассмотрены существующие типы делителей частоты, некоторые практические схемы и основные применения делителей в радиотехнике.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Автор *Ризкин Иосиф Хаимович* — «ДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ»

* * *

Редактор *К. А. Шульгин* Технич. редактор *И. М. Скворцов*

Сдано в набор 14/III 1956 г. Подписано к печати 14/V 1956 г.
Бумага 84×108$^1/_{32}$ Объем 2,05 п. л. Уч.-изд. л. 2,3
Т-04183 Тираж 25 000 экз. Цена 90 коп. Заказ № 1154

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Частоты колебаний, используемых современной радиотехникой, занимают очень широкую полосу. Она начинается с частот порядка долей герца и достигает частот, измеряемых десятками тысяч миллионов герц.

Радиотехника немыслима без возможности преобразовать частоту, т. е. перенести частоту (или полосу частот), соответствующую определенному сигналу (речи, музыке, изображению и т. д.) из одной области частотного диапазона в другую. Именно с таким преобразованием частоты мы имеем дело в процессах модуляции и детектирования.

Однако в ряде случаев появляется необходимость в несколько другом преобразовании частоты. Иногда частоту необходимо увеличить или уменьшить точно в определенное число раз. Тогда говорят соответственно об умножении или делении частоты.

Данная брошюра посвящена делителям частоты синусоидальных колебаний, т. е. устройствам, позволяющим точно в определенное число раз уменьшать частоту синусоидального колебания. Делители частоты импульсных колебаний здесь не рассматриваются.

Что такое делитель частоты. Делитель частоты — это устройство, позволяющее поделить частоту, т. е. уменьшить ее в определенное число раз. Можно осуществить деление частоты не только на целое, но и на дробное число. Например, частоту можно поделить на 2, 3 или 5, и на $^4/_3$, $^3/_5$ и т. д. В последнем случае можно говорить, конечно, и об умножении в дробное число раз (на $^3/_4$, $^5/_3$ и т. д.), однако это умножение не имеет ничего общего с умножением частоты в целое число раз, осуществляемым в обычных умножителях частоты. В то же время оно ничем принципиально

не отличается, как будет разъяснено дальше, от деления на целое число.

Однако не всякое устройство, позволяющее получить поделенную частоту, т. е. преобразовать частоту f в частоту f/n (число n называется коэффициентом деления частоты), может быть названо делителем частоты. Для этого оно должно отвечать, по крайней мере, еще двум требованиям. Во-первых, при изменении частоты подводимого напряжения частота напряжения на выходе устройства должна тоже измениться, и притом так, чтобы отношение частоты колебаний на входе к частоте колебаний на выходе попрежнему было бы абсолютно точно равно коэффициенту деления. Во-вторых, частота на выходе делителя совершенно не должна отклоняться при изменениях величин элементов делителя (индуктивностей, сопротивлений, емкостей и т. д.), если только частота подводимого напряжения остается постоянной. Иначе говоря, коэффициент деления не должен зависеть от параметров устройства.

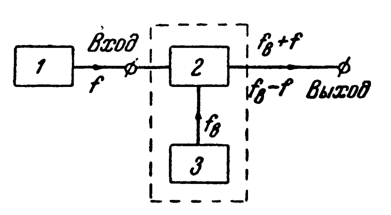
Практически оба эти требования, действительно, выполняются, однако лишь до тех пор, пока соответствующие изменения не слишком значительны, т. е. пока невелико отклонение частоты входного напряжения или не очень сильно изменились параметры элементов устройства.

Замечательной особенностью делителей частоты является то обстоятельство, что стабильность поделенной частоты (т. е. частоты напряжения, снимаемого с выхода делителя) равна стабильности делимой частоты. В самом деле, пусть делимая частота f увеличилась на величину Δf и стала равной $f+\Delta f$. Если частоте f на входе соответствовала частота f/n на выходе, то теперь частота на выходе стала равна $\frac{f+\Delta f}{n}=\frac{f}{n}+\frac{\Delta f}{n}$. Иначе говоря, изменение частоты подводимых колебаний Δf на входе вызвало в n раз меньшее изменение частоты на выходе. Но и исходная частота на выходе в n раз меньше, чем на входе. Поэтому стабильности делимой частоты ($\Delta f/f$) и поделенной частоты ($\Delta f/n : f/n = \Delta f/f$) оказываются равными.

Таким образом, делитель уменьшает отклонение частоты от исходного значения, но отношение этого отклонения к исходной частоте (т. е. стабильность частоты) остается неизменным.

То обстоятельство, что делитель позволяет понизить частоту, не изменяя ее стабильности, и свойство делителя уменьшать при делении отклонения частоты широко используются в радиотехнике.

Отличие делителя частоты от обычного преобразователя частоты можно показать на следующем примере. Частоту f можно преобразовать в частоту $f/2$ (в качестве примера рассмотрим деление на два) с помощью устройства, схема которого изображена на фиг. 1. Здесь на входе смесителя *2* действуют два напряжения, одно из которых с частотой f подается с выхода основного генератора *1*, а другое с частотой $f_в$ от вспомогательного генератора *3*. На выходе смесителя возникают колебания с частотами $f_в - f$ и $f_в + f$. Если выбрать частоту $f_в$ равной $3f/2$, то разностная частота $f_в - f$ как раз и даст частоту $f/2$, т. е. мы получим напряжение поделенной частоты.



Фиг. 1. Преобразователь частоты, позволяющий получить половинную частоту.

1 — основной генератор; *2* — смеситель; *3* — вспомогательный генератор.

Однако, это устройство, состоящее из смесителя и вспомогательного генератора, представляет собой не делитель, а обычный преобразователь частоты, поскольку оно не удовлетворяет тем двум требованиям, о которых было сказано выше. В отличие от делителя частоты здесь и при неизменной частоте основного генератора разностная частота может измениться и стать неравной $f/2$, если только частота вспомогательного генератора отклонится вследствие нестабильности от значения $3f/2$. По этой же причине при изменении частоты основного генератора частота на выходе устройства может измениться совершенно произвольно, так как вспомогательный генератор полностью независим от основного генератора. Более того, можно себе представить и такой случай, когда, несмотря на изменение частоты собственных колебаний основного генератора, частота колебаний на выходе смесителя вообще не изменится из-за соответствующего ухода частоты вспомогательного генератора.

Следовательно, в отличие от делителя частоты, в котором изменения частоты колебаний на выходе «жестко» свя-

заны с изменениями частоты на входе, частота колебаний на выходе преобразователя в равной мере зависит от частот обоих генераторов. Это приводит, в частности, к тому, что стабильность частоты напряжения на выходе устройства будет ниже стабильности основного генератора: отклонения частот обоих генераторов могут сложиться. Поэтому в отличие от делителя частоты это устройство не позволяет получить на выходе ту же стабильность, что и на входе.

Делители частоты используются во многих областях радиотехники: в радиолокационной и телевизионной аппаратуре, в радиовещательных передатчиках с частотной модуляцией, в аппаратуре для измерения частоты и времени, в технике высокочастотной связи по проводам и т. д.

Основные теоретические и экспериментальные исследования явлений, происходящих при делении частоты, без знания которых было бы невозможно столь широкое использование делителей, выполнены главным образом в нашей стране. Особые заслуги в разработке этих вопросов принадлежат академикам Л. И. Мандельштаму и Н. Д. Папалекси.

СХЕМЫ ДЕЛИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Схемы делителей частоты синусоидальных колебаний, нашедшие практическое применение, можно разделить на три группы.

К первой группе относятся простейшие делители, в которых получение составляющих поделенной частоты основано на искажении формы напряжения, подведенного ко входу делителя. В этих делителях единственным источником, за счет которого могут возникнуть колебания поделенной частоты, является генератор напряжения делимой частоты. Сам же делитель представляет собой устройство, которое лишь искажает форму подведенного напряжения таким образом, что на выходе появляются колебания поделенной частоты. Наличие каких бы то ни было генераторов, батарей или иных источников энергии в составе такого делителя необязательно.

Для делителей второй группы характерна возможность «возбуждения» в них колебаний поделенной частоты, когда ко входу устройства подведено напряжение и когда сосредоточенное в нем усиление достаточно велико. Процесс возбуждения колебаний в таких делителях имеет много общего с возбуждением колебаний в обычном ламповом гене-

раторе. Вместе с тем имеется и существенная разница, так как возбуждение в делителе возможно лишь при наличии напряжения на входе, а частота колебаний целиком определяется частотой этого напряжения (а не величинами элементов устройства) и точно в определенное число раз меньше ее. В отличие от делителей первой группы генератор напряжения делимой частоты не является здесь источником колебаний деленной частоты. Напряжение, приложенное ко входу устройства, лишь создает условия, необходимые для возбуждения этих колебаний. Поскольку возбуждение невозможно без наличия усилителя мощности, увеличивающего мощность нарастающих колебаний, последний обязательно входит в состав делителя. Поэтому делители этой группы и называются делителями частоты с усилителями мощности. Анодные батареи этих усилителей являются теми источниками энергии, за счет которых в системе существуют колебания поделенной частоты.

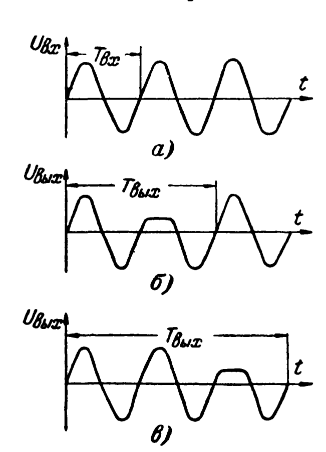
В третью группу входят такие делители, в которых содержится самостоятельный генератор, генерирующий колебания и тогда, когда напряжение делимой частоты не подведено ко входу устройства. Как и во всяком генераторе, частота колебаний определяется исключительно его параметрами. Однако, дело обстоит так лишь до тех пор, пока на входе делителя нет напряжения. Если же оно имеется и выполнены некоторые дополнительные условия, то частота колебаний генератора становится равной поделенной частоте внешнего напряжения и определяется исключительно этой частотой. В таких случаях говорят о синхронизации возбужденного генератора на субгармонике частоты воздействия (субгармоникой частоты f называется частота f/n, т. е. в определенное число раз меньшая). Такие делители называются делителями частоты с возбужденными генераторами.

Простейшие делители частоты

Представим себе устройство, обладающее тем свойством, что если на его вход подано синусоидальное напряжение с периодом $T_{вх}$ (фиг. 2,*а*), то в течение времени, равного одному периоду, оно передает это колебание на выход без искажений, а в течение другого — с некоторыми искажениями. Пусть, например, в каждый четный период подаваемого напряжения форма его искажается, а в каждый нечетный остается неискаженной

(фиг. 2,*б*). В этом случае период выходного напряжения $T_{вых} = 2T_{вх}$. Если искажать каждый третий период входного напряжения, то $T_{вых} = 3T_{вх}$.

Включив после такого искажающего устройства фильтр, настроенный на частоту, вдвое или втрое меньшую частоты входного напряжения, мы получим на выходе его синусоидальное напряжение поделенной частоты. Для увеличения амплитуды напряжения можно использовать фильтр в сочетании с усилителем (например, резонансный усилитель).



Фиг. 2. Деление частоты как результат искажения формы кривой входного напряжения.

а — входное напряжение; *б* — выходное напряжение при делении частоты на два; *в*—то же при делении частоты на три.

Если к тому же в этом устройстве частота колебаний на выходе совершенно не зависит в некоторых пределах от изменения величин элементов схемы, а определяется исключительно частотой напряжения на входе, то такое устройство действительно является делителем частоты синусоидальных колебаний.

Заметим еще, что совершенно несущественно, как искажается форма напряжения на входе, важно лишь, чтобы она в течение каждого второго периода отличалась от формы напряжения во время двух соседних периодов (при делении частоты на два). Поэтому можно искажать форму кривой подводимого напряжения в течение всех периодов, но только искажения эти должны быть различными для разных периодов.

К рассматриваемой группе относится в частности так называемый магнитный делитель частоты. Достоинствами его являются простота устройства, механическая прочность и высокий к. п. д.

Делители частоты с усилителями мощности

Основным элементом схемы этих делителей служит преобразователь частоты, находящийся под воздействием двух напряжений различных частот (f_1 и f_2). Напряжение

на выходе преобразователя складывается из синусоидальных колебаний с частотами $mf_1 \pm nf_2$, где m и n — положительные целые числа. Эти образовавшиеся частоты называются комбинационными (или просто «комбинациями» частот f_1 и f_2), а сумма чисел m и n — «порядком» комбинационной частоты. Возможны, например, такие комбинационные частоты: $1f_1 + 1f_2$ и $1f_1 - 1f_2$ (порядок обеих комбинаций равен двум), $2f_1 + 2f_2$ (порядок 4) и т. д. Заметим, что промежуточная частота, напряжение которой образуется в преобразователе частоты (смесителе) супергетеродинного приемника, является комбинацией второго порядка $f_г - f_c$, где $f_г$ — частота гетеродина, f_c — частота сигнала.

В преобразователе частоты, входящем в рассматриваемые делители, мощность колебаний комбинационной частоты на его выходе должна превышать мощность колебаний одной из преобразуемых частот, подведенных ко входу. Такой преобразователь может быть собран на пассивных элементах (например, меднозакисных выпрямителях, вакуумных или германиевых диодах) и содержать обычный неискажающий усилитель мощности, либо он может быть выполнен на активных элементах (например, на вакуумных или полупроводниковых триодах). В последнем случае преобразование частоты может сопровождаться увеличением мощности.

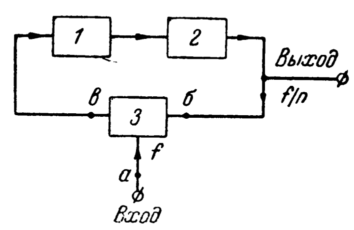
Независимо от того, какой из этих двух способов построения преобразователя применен в данном конкретном делителе, в нем обязательно должно быть сосредоточено некоторое усиление. Заметим еще раз, что в простейших делителях наличие или отсутствие усилителя определяло лишь величину амплитуды колебания поделенной частоты на выходе, и никак не было связано с самой возможностью поделить частоту. Наоборот, в тех схемах, о которых идет речь здесь, деление частоты было бы невозможно без усилителя мощности.

Кроме преобразователя частоты и усилителя мощности, в состав делителя должен войти еще фильтр, пропускающий лишь колебания, частоты которых близки к деленной частоте f/n.

Блок-схема делителя частоты с усилителем мощности представлена на фиг. 3. Здесь усилитель *1*, обладающий относительно широкой полосой пропускания, фильтр *2* и

преобразователь частоты *3* образуют замкнутую цепь (цепь с обратной связью). Коэффициент усиления усилителя выбран таким, что когда напряжение на входе делителя отсутствует, колебания в нем возбудиться не могут. На преобразователь частоты воздействуют два напряжения: одно из них (синусоидальное) с частотой f, которую нужно поделить, приложено на входе (в точке *а*), а другое (приложенное в точке *б*) имеет частоту f/n и поступает с выхода делителя.

Рассмотрим действие делителя на простейшем примере— делении в 2 раза. В первый момент, когда делитель еще не начал работать, напряжение на его выходе обусловлено флюктуациями и представляет собой сумму бесконечного числа очень малых синусоидальных напряжений всех частот. В частности, среди них имеется и напряжение частоты $f/2$. В результате взаимодействия в преобразователе этого сложного напряжения с колебанием частоты f на выходе преобразователя появляются колебания самых разнообразных частот.



Фиг. 3. Блок-схема делителя частоты с усилителем мощности.

1— усилитель мощности; *2*— фильтр на частоту f/n; *3* — преобразователь частоты.

Допустим сначала, что в преобразователе образуются лишь комбинационные частоты второго порядка. Тогда из-за взаимодействия колебаний с частотами f и $f/2$ возникнут лишь колебания разностной частоты $f - f/2 = f/2$ и суммарной частоты $f + f/2 = 3f/2$. Другие частоты, комбинируясь с частотой f, также дадут суммарную и разностную комбинацию. Но одна частота занимает среди всех них совершенно особое положение — это частота $f/2$. Будучи подведена к преобразователю (в точке *б*), она совместно с частотой f вызовет появление на его выходе (в точке *в*) колебания с частотой, равной «самой себе», так как помимо частоты $3/2f$ образуется снова частота $f/2$. Никакая другая частота этим свойством не обладает, она не «повторяется» при прохождении через преобразователь. Поэтому в системе могут возбудиться колебания с частотой, точно равной $f/2$.

В самом деле, возникшее в преобразователе напряжение частоты $f/2$ усилится усилителем *1*, свободно пройдет через

фильтр 2 и снова попадет на выход делителя и, следовательно, на вход преобразователя. Если усиление превосходит затухание, вносимое другими элементами замкнутой цепи, то напряжение с частотой $f/2$ в результате прохождения через цепь обратной связи увеличится. Амплитуда колебаний частоты $f/2$ будет нарастать, пока из-за нелинейности устройства это нарастание не прекратится (нелинейность может быть заключена в преобразователе, усилителе или в обоих этих узлах). Так происходит возбуждение колебаний половинной частоты.

Что же произойдет с колебаниями других частот? Рассмотрим, например, колебания с частотой f_1, очень мало отличающейся от $f/2$. Как бы ни было мало это отличие, разность частот f и f_1 не даст снова частоты f_1. Поэтому колебания, имевшие частоту f_1, после преобразования изменят свою частоту и, поступив через цепь обратной связи к преобразователю, уже не смогут поддержать существования колебаний частоты f_1. Тем более не могут возбудиться колебания частот, далеких от $f/2$: во-первых, для них остается в силе сказанное в отношении частоты f_1, а во-вторых, фильтр 2 вносит на этих частотах значительное затухание.

Таким образом, если в рассматриваемом устройстве, находящемся под внешним воздействием напряжения с частотой f, возбуждаются колебания, то частота их может быть равной только $f/2$. Никакие, даже сколь угодно малые отклонения от этого соотношения невозможны. Следовательно, коэффициент деления в этом случае равен двум. Для возбуждения колебаний необходимо, чтобы усиление, заключенное в замкнутой цепи (для напряжения частоты $f/2$), превосходило соответствующее затухание.

Но этого еще недостаточно для того, чтобы система представляла собой делитель частоты. Посмотрим, как отразится на частоте выходного напряжения изменение частоты входного (при неизменных параметрах устройства) и изменение параметров при постоянной частоте колебаний на входе.

Изменение частоты f не скажется на самом процессе преобразования, однако, если оно станет значительным, фильтр 2 будет вносить сравнительно большое затухание, и колебания могут прекратиться. Но пока этого не случится, частота колебаний на выходе устройства будет следовать

за частотой колебаний на его входе, оставаясь в точности равной ее половине. Таким образом, частоты на входе и выходе делителя жестко связаны между собой.

Если же частота подводимых колебаний постоянна, а величины некоторых деталей устройства изменятся, то, несмотря на это, частота напряжения на выходе будет оставаться совершенно неизменной. Однако и в этом случае колебания могут исчезнуть (например, тогда, когда фильтр начнет вносить большое затухание на частоте $f/2$).

Подведем теперь итог сказанному. В устройстве с обратной связью, состоящем из преобразователя, находящегося под воздействием напряжения делимой частоты, усилителя мощности и фильтра, настроенного на частоту, близкую к поделенной, возможно возбуждение колебаний, частота которых в 2 раза меньше частоты на входе. Поскольку колебания эти в схеме возбуждаются, источником их является усилитель, обусловливающий самую возможность нарастания колебаний. Однако это возбуждение возможно лишь при наличии внешнего напряжения. Воздействуя совместно с выходным напряжением на преобразователь частоты, оно образует напряжения комбинационных частот, одной из которых и является поделенная частота. Поэтому именно преобразователь и является тем основным узлом делителя, который позволяет произвести само изменение частоты входного напряжения.

Мы рассмотрели случай, когда в преобразователе возникают лишь комбинационные частоты второго порядка. При этом коэффициент деления равен двум. В общем виде правило для определения поделенной частоты можно сформулировать так:

Частота колебаний, возбуждающихся в устройстве и поступающих в преобразователь с выхода делителя, такова, что одна из комбинаций ее с делимой (входной) частотой дает снова частоту выходного напряжения.

Если обозначить частоту напряжения на выходе делителя через $f_{вых}$, а частоту напряжения на входе через f, то в разобранном случае это условие можно записать так:

$$f - f_{вых} = f_{вых},$$

или

$$f + f_{вых} = f_{вых}.$$

Второе равенство выполнить, очевидно, нельзя, а из первого следует, что $f_{вых}=f/2$. Образование суммарной комбинационной частоты, в отличие от разностной, не может, таким образом, служить причиной возникновения процесса деления.

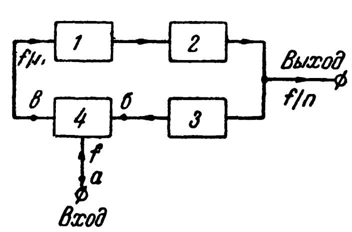
Для того чтобы поделить частоту более чем в 2 раза, нужно использовать комбинации порядка выше второго. Если, например, частота $f_{вых}$ образует с делимой частотой f комбинацию третьего порядка $f-2f_{вых}$, то частота возбуждающихся колебаний $f_{вых}$ должна удовлетворять условию $f-2f_{вых}=f_{вых}$. Из этого следует, что $f_{вых}=f/3$, т. е. при использовании комбинационной частоты третьего порядка удается получить деление в 3 раза. Чем в большее число раз нужно поделить частоту, тем большим должен быть порядок комбинации. Повышая порядок комбинации, можно осуществить деление в дробное число раз. Если, например, используется частота $3f-f_{вых}$, то мы получим деление частоты на $^2/_3$ (или умножение на $^3/_2$). Деление в дробное число раз, таким образом, ничем не отличается от деления в целое число раз, большее двух.

В рассмотренных случаях мы сталкиваемся с необходимостью повысить порядок комбинационной частоты в преобразователе. Это приводит к появлению определенных трудностей, сильно затрудняющих (а иногда делающих невозможным) деление частоты в большое число раз.

Для того чтобы в делителе с усилителем мощности возникли колебания поделенной частоты, амплитуда напряжения на входе должна, как правило, лежать в определенных пределах. При повышении порядка комбинации эти пределы сближаются, причем необходимая минимальная амплитуда увеличивается. В некоторых случаях возбуждение колебаний при отсутствии специального воздействия на делитель вообще оказывается невозможным. Если при малых коэффициентах деления форма напряжения на выходе устройства может быть сделана очень близкой к синусоидальной, то при делении в большое число раз она заметно искажается. При этом уменьшается амплитуда колебаний поделенной частоты, и процесс деления срывается даже при небольших изменениях величин элементов схемы. Вследствие этого поделить частоту тем труднее, чем больше коэффициент деления.

При необходимости получить устойчивое деление во много раз (порядка нескольких сотен) часто приходится прибегать к последовательному включению большого числа делителей, что, конечно, значительно усложняет и удорожает аппаратуру. Все это заставило искать другие пути построения схем таких устройств. Были предложены, например, делители не с одним (как в схеме фиг. 3), а с двумя преобразователями. Цель этого усложнения состоит в том, чтобы и при делении частоты более чем в 2 раза использовать комбинации второго порядка.

Блок-схема делителя с двумя преобразователями частоты приведена на фиг. 4. Здесь, помимо усилителя *1*, фильтра *2*, настроенного на частоту f/n, и преобразователя *4*, имеется второй преобразователь (умножитель частоты) *3* с соответствующим фильтром. Допустим, что нам нужно поделить частоту f в 3 раза. Коэффициент умножения частоты в этом случае выбирается равным двум. Колебания частоты $f/3$ поступают на вход умножителя и преобразуются им в колебания частоты $2f/3$. Таким образом, на преобразователь *4* (аналогичный преобразователю *3* в схеме фиг. 3) воздействуют напряжения двух частот: частоты f и частоты $2f/3$. Разностная частота второго порядка $f—2f/3$ дает снова частоту $f/3$, так что при достаточном усилении колебания частоты $f/3$ поддерживаются цепью обратной связи и непрерывно действуют на выходе делителя.



Фиг. 4. Блок-схема делителя частоты с усилителем мощности и двумя преобразователями.

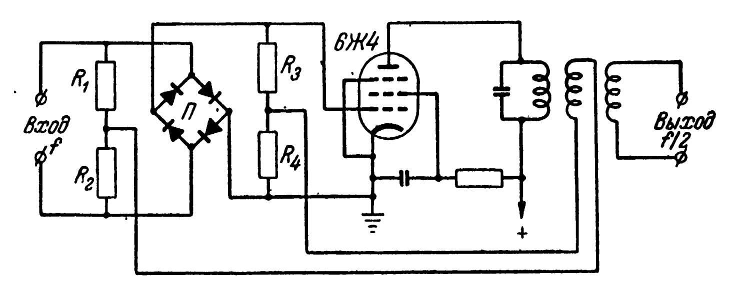
1—усилитель мощности; *2*— фильтр на частоту f/n; *3* — умножитель частоты с фильтром на умноженную частоту; *4* — преобразователь частоты.

Итак, умножение частоты всегда позволяет использовать в преобразователе комбинационную частоту второго порядка. Повышение коэффициента деления приводит лишь к необходимости увеличить коэффициент умножения в умножителе (например, при делении на четыре он должен быть равен трем).

Использование комбинационной частоты второго порядка в значительной мере устраняет те недостатки делителей с большим коэффициентом деления, о которых мы говорили

выше. Поэтому схемы с умножителями нашли широкое применение.

Практические схемы делителей с усилителями мощности. На фиг. 5 изображена схема делителя частоты, имеющего коэффициент деления, равный двум, и предназначенного для деления частот до нескольких мегагерц. Делитель состоит из резонансного усилителя с лампой 6Ж4 и преобразователя частоты с полупроводниковыми вентилями, собранного по «кольцевой» схеме. Замкнутая цепь здесь образуется следующим образом: сетка усилительной лампы — анодная цепь лампы с контуром, настроенным на половинную частоту,— катушка обратной связи — средние точки сопротивле-



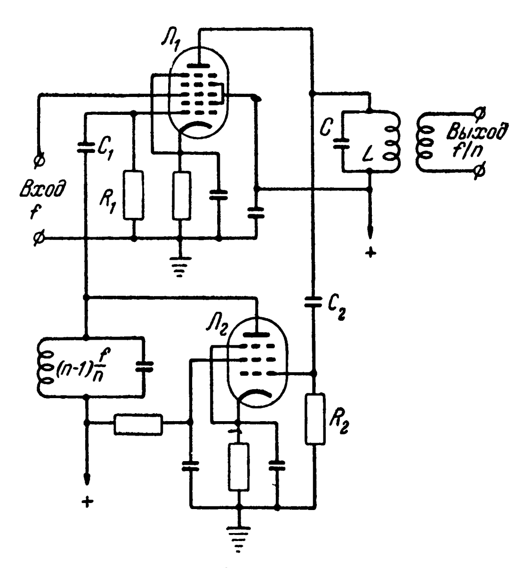
Фиг. 5. Схема делителя частоты с усилителем мощности и кольцевым преобразователем (коэффициент деления равен двум).

ний кольцевого преобразователя *П*. К достоинствам данного делителя следует отнести наличие в нем кольцевого преобразователя, вносящего большое затухание для напряжений входных частот, а также и то, что форма напряжения на его выходе близка к синусоидальной.

Если на вход обычного преобразователя частоты, например одноламтового смесителя, подать напряжения двух частот, то в напряжении на его выходе, помимо составляющих разностной и суммарной частоты, будут содержаться еще и составляющие частот, поданных на вход преобразователя. На выходе кольцевого преобразователя составляющие входных частот отсутствуют (они подавляются благодаря особой схеме преобразователя). Поэтому на выходе кольцевого преобразователя, входящего в делитель, отсутствуют напряжения с частотой f и частотой колебаний, поступающих из цепи обратной связи. Появление же частоты $f/2$ на управляющей сетке лампы объясняется не непосредственным прохождением этих колебаний через

преобразователь, а взаимодействием их с колебаниями частоты f. Таким образом, в делителе не могут возбудиться колебания в отсутствие входного напряжения, так как цепь обратной связи, проходящая через преобразователь, будет в этом случае разорвана.

Отметим, что вентили и сопротивления, входящие в преобразователь, должны быть тщательно подобраны (вентили должны быть близки по своим параметрам, а $R_1 = R_2$ и



Фиг. 6. Схема делителя частоты с усилителем мощности, содержащая активный преобразователь и умножитель (коэффициент деления больше двух).

$R_3 = R_4$). В качестве вентилей могут быть использованы германиевые диоды или купроксные элементы (последние только в случае деления низких частот).

Несмотря на указанные достоинства делителя с кольцевым преобразователем, часто применяют более простые схемы преобразователей, выполненные только на электронных лампах. В этом случае преобразование частоты сопровождается усилением, что позволяет иногда обойтись без включения в схему усилителя.

На фиг. 6 изображена схема подобного делителя частоты с коэффициентом деления, большим двух. Первый кас-

кад с лампой $Л_1$ представляет собой преобразователь частоты. Его анодный контур LC настроен на разностную частоту

$$f-(n-1)\frac{f}{n}=\frac{f}{n}.$$

Колебания с частотой $(n-1)\frac{f}{n}$ подводятся к преобразователю с выхода умножителя, коэффициент умножения которого равен $n-1$, а колебания с частотой f/n поступают на вход умножителя с анодного контура преобразователя.

Связь между каскадами (параметры цепей C_1R_1 и C_2R_2) и режим работы ламп подбираются так, чтобы в отсутствие напряжения на входе система не возбуждалась.

В качестве преобразовательной можно применять обычные смесительные лампы, а для умножения — лампу 6Ж4, режим работы которой подбирается таким, чтобы получить достаточную амплитуду необходимой гармоники.

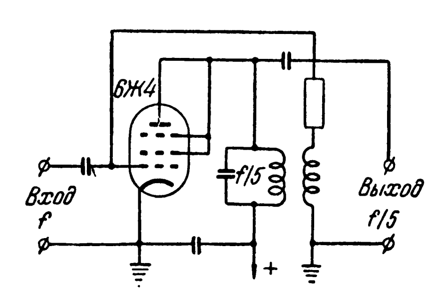
Схемы, подобные изображенной на фиг. 6, часто осуществляют и с кольцевым преобразователем на полупроводниковых вентилях, заменяющем в этом случае лампу. Умножитель частоты чаще всего выполняется ламповым.

Только что рассмотренные схемы делителей являются лучшими. Основное достоинство их заключается в высокой стабильности процесса деления, который не нарушается даже при значительных изменениях питающих напряжений, параметров устройства (в том числе собственных частот контуров) и т. д. Коэффициент деления их также достаточно стабилен (в отличие от других типов делителей, в которых он при изменении питающих напряжений или параметров устройства может скачком измениться). Форма напряжения на выходе делителя при хорошо подобранных режиме и амплитуде напряжения на входе близка к синусоидальной.

Однако такие делители довольно сложны. Поэтому вместо них часто применяются делители с более низкими качественными показателями, но зато более простые по устройству. В них один и тот же узел выполняет преобразование, которое в сложных делителях осуществляется несколькими узлами. Схема одного из них с коэффициентом деления, равным пяти, приведена на фиг. 7. Здесь на управляющую сетку лампы 6Ж4 (включенной как триод) подаются напряжения с частотой f (со входа) и частотой $f/5$ (с катушки

обратной связи). Благодаря нелинейности характеристики лампы в анодном контуре выделяются колебания комбинационной частоты пятого порядка ($f—4f/5=f/5$). Таким образом, один преобразователь частоты с высоким порядком комбинации заменяет сочетание преобразователя второго порядка и умножителя. Процесс деления частоты в этом устройстве протекает так же, как и в делителе, собранном по схеме фиг. 4.

Использование комбинационной частоты такого высокого порядка заметно понижает стабильность работы этого делителя. Кроме того, из-за простой схемы преобразователя в нем не исключена возможность возбуждения на собственной частоте, близкой к резонансной частоте контура (в этом случае делитель частоты превращается в обычный генератор синусоидальных колебаний, частота которого не зависит от частоты напряжения на входе). Форма выходного напряжения может сильно отличаться от синусоиды, так как на выходе преобразователя существует большое число колебаний паразитных комбинационных частот. Вообще говоря, форма колебаний на выходе устройства тем хуже, чем больше коэффициент деления.



Фиг. 7. Схема упрощенного делителя частоты с усилителем мощности.

При конструировании делителей, в которых используются комбинационные частоты высоких порядков, следует тщательно стабилизировать питающие напряжения, амплитуду напряжения делимой частоты и позаботиться о стабильности параметров применяемых деталей. В особенности это относится к случаям деления в большое число раз.

Делители частоты с возбужденными генераторами

Делители частоты с генераторами чисто синусоидальных колебаний. Процесс деления частоты в таких устройствах состоит в том, что частота колебаний возбужденного генератора, входящего в делитель, принудительно изменяется внешним напряжением делимой частоты таким образом, что

становится точно в определенное число раз меньше частоты входного напряжения. Иногда это явление называют синхронизацией генератора на субгармонике частоты воздействия.

Таким образом, такой делитель должен содержать синхронизируемый генератор и синхронизирующее устройство. Этим последним является преобразователь частоты, такой же, как и в делителе частоты, выполненном по схеме фиг. 3. Кроме того, в состав делителя входит усилитель и иногда фильтр. Все эти узлы образуют замкнутую цепь (фиг. 8).

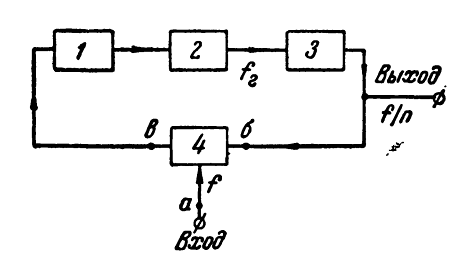
Как видно из фиг. 8, этот делитель отличается от делителя частоты с усилителем мощности (фиг. 3) лишь наличием генератора *2*. Вследствие наличия этого генератора делители рассматриваемой группы и в отсутствие напряжения частоты f дают на выходе колебания, снимаемые с выхода генератора *2*.

Предположим, что генератор *2* дает чисто синусоидальные колебания частоты $f_г$, которая определяется величинами элементов схемы и выбирается близкой к поделенной частоте (f/n). Когда на вход делителя (точка *a*) подается напряжение делимой частоты f, на выходе преобразователя частоты (точка *в*) возникают колебания комбинационных частот, подобно тому как это имеет место в делителях с усилителями мощности. В частности, возникнет и напряжение частоты $f - f_г$. Если необходимо поделить частоту в 2 раза, то частота $f_г$ должна быть близка к $f/2$; иначе говоря, частота колебаний генератора отличается от $f/2$ на малую величину $\Delta f_г$ $\left(\text{т. е. } f_г = \frac{f}{2} + \Delta f_г\right)$. Разностная частота на выходе преобразователя будет равна $\frac{f}{2} - \Delta f_г$. Таким образом, к генератору *2*, частота колебаний которого равна $\frac{f}{2} + \Delta f_г$, будет подведено внешнее напряжение близкой частоты $\frac{f}{2} - \Delta f_г$. Если это напряжение достаточно велико, то оно принудительно изменит частоту генератора таким образом, что сделает ее равной частоте этого внешнего напряжения (так называемое «захватывание» частоты). Однако в этом случае изменится и частота на выходе преобразователя, т. е. частота захватывающего напряжения. Устойчивый процесс

возникнет тогда, когда частота захватывающего напряжения станет точно равной частоте колебаний генератора. Очевидно, это произойдет тогда, когда частота $f_г$ в комбинации с частотой f даст снова частоту $f_г$, т. е. $f - f_г = f_г$.

Следовательно, устойчивый процесс возможен лишь при $f_г = f/2$, т. е. когда частота колебаний генератора точно в 2 раза меньше частоты напряжения на входе делителя.

Таким образом, устройство с обратной связью, содержащее преобразователь частоты и генератор синусоидальных колебаний и находящееся под воздействием напряжения делимой частоты, позволяет принудительно установить частоту колебаний генератора точно равной поделенной частоте воздействия. Если в делителе с усилителем мощности такая схема позволяет возбудить колебания поделенной частоты, то здесь она используется для синхронизации генератора на субгармонике частоты воздействия. В обоих случаях в основе процесса деления лежит образование комбинационной частоты в преобразователе, только в одном случае колебания этой частоты используются непосредственно, а в другом — «захватывают» синхронизируемый генератор.



Фиг. 8. Блок-схема делителя частоты с возбужденным генератором и фильтром в замкнутой цепи.

1 — усилитель; 2 — возбужденный генератор; 3 — фильтр; 4 — преобразователь частоты.

Выше мы рассматривали случай, когда в преобразователе образуются комбинации второго порядка (разностная частота). При этом оказывалось возможным поделить частоту на два. Если использовать комбинационные частоты высоких порядков, то можно получить деление в большее число раз, а также в дробное число раз. Поделенную частоту можно найти, пользуясь правилом, приведенным на стр. 12.

Использование комбинационных частот высоких порядков и здесь приводит к значительным затруднениям. Так как амплитуда колебаний поделенной частоты тем меньше,

чем выше порядок комбинации, то для получения деления в большое число раз приходится увеличивать амплитуду входного напряжения и коэффициент усиления усилителя. Кроме того, в этих случаях уменьшается область допустимых расстроек частоты генератора относительно деленной частоты и т. д. Поэтому стараются всегда, когда это возможно, работать с комбинациями второго порядка. С этой целью в систему вводят умножитель частоты. Получающаяся при этом схема аналогична приведенной на фиг. 4 и отличается от нее лишь наличием генератора. Одно из практических устройств этого типа будет рассмотрено ниже.

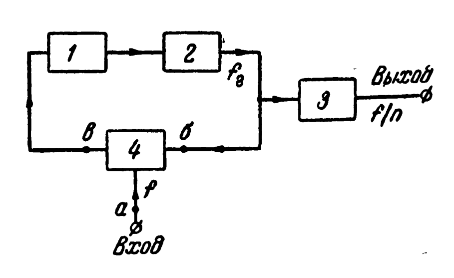
Делители частоты с генераторами несинусоидальных колебаний. Раньше мы принимали, что форма колебаний, которые создаются генератором, входящим в состав делителя, синусоидальна. Однако колебания, снимаемые с выхода любого реального генератора, никогда не бывают чисто синусоидальными. Вследствие этого напряжение на выходе генератора складывается из синусоидального колебания частоты $f_г$ и колебаний частот $2f_г$, $3f_г$ и т. д. Интенсивность гармоник тем меньше, чем ближе форма напряжения генератора к синусоидальной. Например, в генераторах типа *LC* амплитуды этих гармоник очень малы по сравнению с амплитудой колебания основной частоты, а в релаксационных генераторах (например, в мультивибраторах) даже высшие гармоники выражены очень ярко.

Как же сказывается наличие гармоник на работе делителя? Изменение частоты генератора обусловлено воздействием на него комбинационной частоты, близкой к его собственной. Именно на образование этой комбинационной частоты существенное влияние оказывают гармоники основной частоты генератора. Комбинации могут образоваться как сочетание частоты f не только с частотой $f_г$, но и с частотами $2f_г$, $3f_г$ и т. д. Это может сильно облегчить деление в большое число раз.

Поясним это на примере деления в 5 раз. При отсутствии гармоник частота $f/5$, напряжение которой подводится к генератору, могла быть получена лишь как комбинация пятого порядка ($f—4f/5$). Но если в составе напряжения на выходе генератора имеется четвертая гармоника частоты $f/5$, т. е. напряжение частоты $4f/5$, то ту же частоту $f/5$ можно получить как комбинацию всего лишь второго порядка.

Итак, при наличии гармоник удается осуществить деление в число раз, большее двух, используя лишь комбинации второго порядка и не прибегая к умножению частоты.

Для того чтобы форма колебаний, поступающих к преобразователю через цепь обратной связи, была резко несинусоидальной, фильтр *3* в этой цепи должен отсутствовать. Следовательно, форма колебаний поделенной частоты будет несинусоидальной. Для устранения этого недостатка фильтр, настроенный на деленную частоту, все же вводят в устройство, но не в замкнутую цепь, а вне ее — после выходных зажимов делителя (фиг. 9). В этом случае он уже не оказывает влияния на самый процесс деления, а лишь улучшает форму кривой выходного напряжения.



Фиг. 9. Блок-схема делителя частоты с возбужденным генератором и фильтром вне замкнутой цепи.

1 — усилитель; *2* — возбужденный генератор; *3* — фильтр; *4* — преобразователь частоты.

Отсутствие в цепи обратной связи фильтра, настроенного на поделенную частоту, приводит к одному весьма серьезному недостатку: коэффициент деления в таких устройствах может скачкообразно изменяться. Возвратимся к тому же примеру с делением в 5 раз. Пусть, например, частота 20 *кгц* делится до частоты 4 *кгц*. Такая величина коэффициента деления обусловлена комбинацией входной частоты и четвертой гармоники частоты генератора, равной $4f_г$ $(20 - 4 \cdot 4 = 4)$. Однако изменения режима работы генератора и его собственной частоты могут привести к тому, что более благоприятные условия создадутся, например, для деления в 4 раза, что соответствует комбинации $f - 3f_г$ $(20 - 3 \cdot 5 = 5)$. Коэффициент деления таким образом скачкообразно изменится с пяти до четырех. В устройствах с умножителем и фильтром в замкнутой цепи этот «перескок» коэффициента деления затруднялся тем, что напряжение, поступившее к преобразователю, было чисто синусоидальным, а не представляло собой смеси различных гармоник. Кроме того, для токов новой поделенной частоты фильтр

вносил сравнительно большое затухание, что также затрудняло изменение коэффициента деления.

Опыт показывает, что чем резче выражена несинусоидальность формы кривой генератора, тем легче поделить частоту в большое число раз и тем менее устойчив процесс деления.

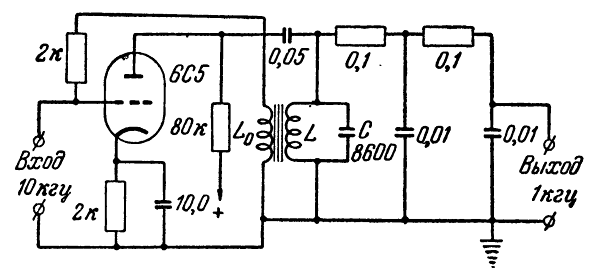
Для того чтобы делители с релаксационными генераторами работали достаточно устойчиво, приходится тщательно стабилизировать напряжения источников питания, амплитуду подводимого ко входу напряжения, использовать лишь достаточно стабильные детали (конденсаторы, сопротивления) и т. д.

Практические схемы делителей с возбужденными генераторами. Схемы делителей с возбужденными генераторами в том виде, как они изображены на фиг. 8 и 9, применяются на практике довольно редко. Они используются, как правило, лишь тогда, когда появляется необходимость в получении целого спектра стабилизированных частот, например ряда гармоник некоторой низкой частоты. Чаще всего применяют более простые схемы синхронизации. Упрощение достигается объединением в одном узле нескольких функций, выполняемых в схемах фиг. 8 и 9 отдельными элементами устройства. Например, вместо того чтобы вводить в делитель самостоятельный преобразователь частоты, используют для образования комбинированной частоты саму генераторную лампу. Тогда одна и та же лампа (или одни и те же лампы) и генерирует колебания, и порождает (благодаря нелинейности своей характеристики) комбинационные частоты, необходимые для синхронизации генератора. Напряжение делимой частоты в этом случае воздействует непосредственно на лампу генератора.

Значительное упрощение устройства, получающееся в этом случае, достигается за счет некоторого ухудшения качества его работы. Прежде всего, если говорить о генераторах синусоидальных колебаний, возникают трудности при делении в большое число раз: использование комбинационных частот высоких порядков приводит к тому, что синхронизации трудно добиться и еще труднее сделать ее стабильной. Основная опасность состоит в том, что процесс синхронизации может прекратиться и на выходе делителя появятся колебания неуправляемой частоты (собственной частоты генератора). Тем не менее такие схемы применяются довольно широко. Налаживать их нужно очень тщательно; после

изготовления следует убедиться, что при допустимых изменениях питающих напряжений, параметров схемы и амплитуды входного напряжения синхронизация не нарушается (в ответственных случаях применяют специальное осциллографическое устройство для контроля синхронизации).

На фиг. 10 приведена схема делителя частоты с коэффициентом деления в 10 раз (частота 10 *кгц* преобразуется в частоту 1 *кгц*), описанная Б. К. Солнцевым[1]. Здесь собственно генератор собран на лампе 6С5 по схеме с индуктивной обратной связью. Схема питания анодной цепи параллельная, благодаря этому через анодный контур LC, настроенный на частоту 1 *кгц*, не протекает постоянная



Фиг. 10. Схема упрощенного делителя с возбужденным генератором типа LC (коэффициент деления равен десяти).

составляющая анодного тока, что повышает устойчивость синхронизации. Катушка контура L (5 000 витков ПЭШО 0,1) и катушка обратной связи L_0 (1 700 витков ПЭШО 0,1) намотаны на альсиферовом кольце. Делитель при хорошо подобранном режиме устойчиво работает при расстройке анодного контура на $\pm$ 5% и при изменении питающих напряжений на $\pm$ (15 ÷ 20) %. Цепь из сопротивлений и конденсаторов на выходе делителя уменьшает напряжения гармоник и в некоторой степени изолирует контур от нагрузки.

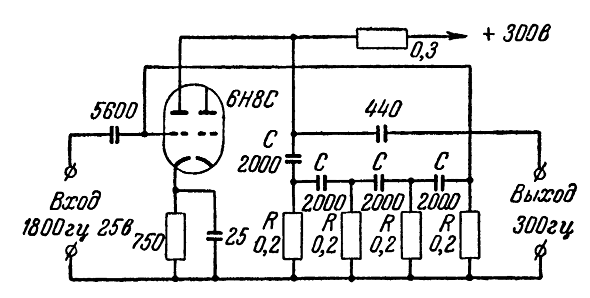
Одно из достоинств таких схем состоит в относительно хорошей форме кривой выходного напряжения (следует заметить, что она ухудшается по мере увеличения коэффициента деления). Близость формы кривой к синусоидальной обеспечивается контуром генератора, выполняющим функции фильтра в схеме фиг. 8. В данном случае этот фильтр состоит из индуктивности и емкости.

---

[1] «Вестник связи», 1954, № 1.

Хорошие результаты получаются также и при синхронизации генераторов синусоидальных колебаний типа RC, в которых роль фильтра выполняют цепи, составленные из сопротивлений и конденсаторов.

На фиг. 11 изображена схема делителя с одноламповым RC-генератором, содержащим многозвенную фазосдвигающую цепь из R и C; схема позволяет поделить частоту в 6 раз. Частота напряжения на входе с амплитудой в 25 *в* равна 1 800 *гц*. Такие устройства особенно удобны в низкочастотном диапазоне, где они, как правило, оказываются гораздо более компактными, чем те, которые содержат контуры из индуктивностей и емкостей.



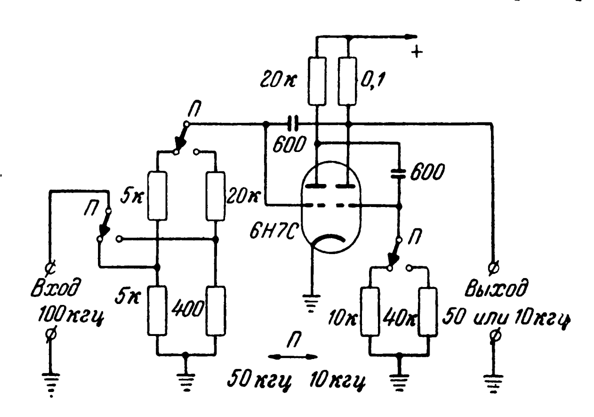
Фиг. 11. Схема упрощенного делителя частоты с возбужденным генератором типа RC (коэффициент деления равен шести).

Часто применяется синхронизация релаксационных генераторов. Схемы таких делителей аналогичны схеме фиг. 9, они не имеют фильтра в замкнутой цепи, благодаря чему легко осуществить деление частоты в большое число раз. Помимо того эти делители позволяют получить большое число гармоник стабилизированной частоты (стабилизируется целая гармоническая «сетка» частот), что оказывается иногда очень полезным (например, в калибраторах частоты). Все это обусловило довольно широкое применение делителей с релаксационными генераторами. Чаще всего используются мультивибраторы, хотя хорошие результаты можно получить и с релаксационными генераторами других типов.

Основной задачей при конструировании делителей с релаксационными генераторами является обеспечение стабильности самого процесса синхронизации и постоянства коэффициента деления. Некоторых результатов в этом на-

правлении можно добиться, подбирая элементы цепей RC мультивибратора, величину входного напряжения, а также способ его введения в схему.

Если мультивибратор симметричен, то делению в четное число раз способствует введение синхронизирующего напряжения в цепи обеих ламп в одной и той же фазе. При делении в нечетное число раз фазы этих напряжений целесообразно сдвигать на 180°. Когда входное напряжение вводится в цепь только одной лампы, условия для деления в четное и нечетное число раз оказываются примерно одинаковыми. Во всех случаях следует возможно тщательнее стабилизировать амплитуду входного напряжения, так как это уменьшает опасность скачкообразного изменения коэффициента деления. Постоянства коэффициента деления можно добиться, выбирая различными величины сопротивлений и емкости конденсаторов в цепях сетки разных ламп мультивибратора. Хорошие результаты дает и применение положительного смещения на управляющие сетки ламп.

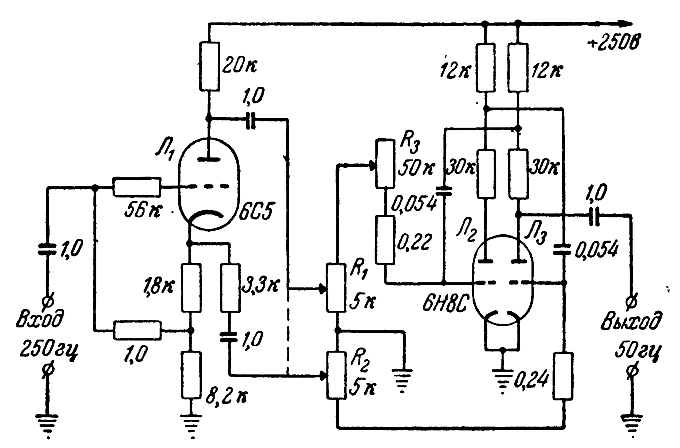


Фиг. 12. Схема делителя частоты с мультивибратором; коэффициент деления два или десять.

Ниже приводятся схемы двух делителей с мультивибраторами. Первый из них с несимметричной схемой мультивибратора (фиг. 12) позволяет поделить частоту в 2 или в 10 раз (в зависимости от положения переключателя). Входное напряжение в этом делителе воздействует только на левый (по схеме) триод, причем оно приложено к части сопротивления, включенного в цепь его управляющей сетки.

Второй делитель (фиг. 13) предназначен для деления

частоты 250 *гц* в 5 раз. Он несколько сложнее первого и содержит три лампы. Лампа $Л_1$ используется для получения сдвига фаз между напряжениями, вводимыми в сеточные цепи разных ламп (коэффициент деления — нечетное число). Спаренные потенциометры R_1 и R_2 предназначены для изменения напряжения синхронизации. Переменное сопротивление R_3 позволяет изменять частоту колебаний мультивибратора, что дает возможность подбирать оптимальные условия для синхронизации.



Фиг. 13. Схема делителя частоты с мультивибратором и преобразователем фазы.

При тщательном выполнении делителей частоты с мультивибраторами они обеспечивают устойчивое деление при довольно больших изменениях питающих напряжений (иногда порядка 20%) и при некоторых изменениях (до 10%) емкостей конденсаторов в сеточных цепях ламп.

Если требуется снять с выхода делителя синусоидальное напряжение только одной частоты, то вслед за мультивибратором включают резонансный усилитель. В этих случаях такие делители получаются достаточно сложными и их применение становится нецелесообразным. Наоборот, при необходимости получить серию стабильных частот использование делителя с мультивибратором вполне оправдано.

Следует подчеркнуть, что делители частоты с синхронизированными генераторами нельзя применять в тех случаях, когда требуется, чтобы при отсутствии входного напряжения отсутствовало бы и напряжение на выходе делителя.

Характеристики делителей частоты

Частотной характеристикой делителя обычно называют зависимость амплитуды напряжения поделенной частоты на выходе делителя от частоты напряжения на входе. Как мы уже знаем, напряжение поделенной частоты существует на выходе лишь при определенном соотношении между частотой входного напряжения и параметрами делителя. Например, в делителях с усилителями мощности фильтр должен быть настроен примерно на поделенную частоту входного напряжения. В делителях с возбужденными генераторами, помимо соответствующей настройки фильтра, для возникновения процесса деления требуется также близость основной частоты собственных колебаний генератора к поделенной частоте. Когда необходимое соотношение нарушается, то выходное напряжение либо исчезает (например, в делителях с усилителями), либо изменяется его частота — она уже не будет равна поделенной (в делителях с генераторами).

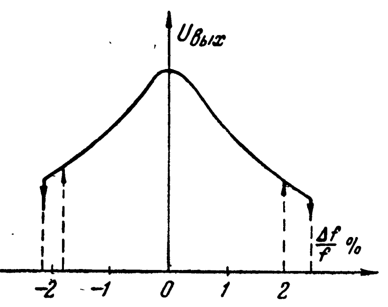
Если параметры делителя (например, частоты настройки фильтров) остаются неизменными, то напряжение поделенной частоты существует на выходе лишь до тех пор, пока частота напряжения на входе лежит в определенных пределах — как говорят, внутри «области деления». На краях этой области частотная характеристика обрывается, так как процесс деления прекращается из-за слишком большого затухания, вносимого фильтром, который оказывается расстроенным относительно поделенной частоты.

Заметим, что в случае применения делителя в схемах стабилизации частоты частотная характеристика и величина области деления по частоте входного напряжения не имеют большого практического значения, так как частота входного напряжения в этих случаях очень стабильна (ее отклонения заведомо меньше 0,01%, в то время как область деления охватывает отклонения частоты, как правило, не меньше десятых долей процента).

В качестве примера на фиг. 14 приведена частотная характеристика делителя частоты с усилителем мощности, позволяющего уменьшить частоту в 5 раз. Как видно из графика, при некоторой частоте входного напряжения амплитуда на выходе имеет максимум. Следует иметь в виду, что частота входного напряжения, соответствующая срыву уже возбужденных колебаний, отличается от частоты, при кото-

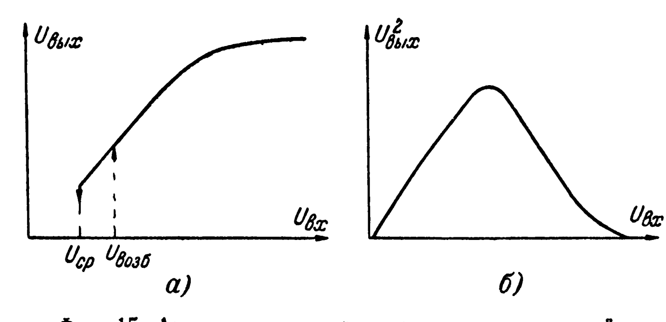
рой колебания возбуждаются. Форма частотной характеристики зависит от величины входного напряжения.

Амплитудная характеристика представляет собой зависимость амплитуды напряжения поделенной частоты от амплитуды входного напряжения. Она имеет различный характер для разных типов делителей. Ее характерные точки соответствуют амплитудам входного напряжения, при которых возникает и срывается процесс деления.



Фиг. 14. Частотная характеристика делителя частоты с усилителем (коэффициент деления равен пяти).

Амплитудная характеристика делителя с усилителем мощности и самостоятельными преобразователями приведена на фиг. 15,*а*. Ее особенностью является наличие почти прямолинейного и очень пологого участков. В некоторых случаях входное напряжение выбирают таким, что оно соответствует пологому участку; тогда даже значительные колебания амплитуды



Фиг. 15. Амплитудные характеристики делителей.
а — характеристика делителя с усилителем мощности и самостоятельными преобразователями; *б* — характеристика делителя с усилителем мощности без самостоятельного преобразователя.

входного напряжения вызывают лишь очень малые изменения амплитуды напряжения на выходе.

Для амплитудной характеристики фиг. 15,*а* характерно еще одно обстоятельство. Если при плавном увеличении амплитуды подводимого напряжения колебания поделенной

частоты возбуждаются при амплитуде $U_{возб}$ то при уменьшении амплитуды возбужденные колебания срываются не при той же величине $U_{возб}$, а при другой, равной $U_{ср}$.

В некоторых делителях увеличение амплитуды входного напряжения приводит сначала к возникновению, а затем к срыву процесса деления. В качестве примера на фиг. 15,*б* приведена амплитудная характеристика делителя с усилителем мощности без самостоятельного преобразователя (схема его дана на фиг. 7). Когда амплитудная характеристика ограничена с обеих сторон (как на фиг. 15,*б*), то говорят о некоторой области амплитуд входного напряжения, внутри которой возможно деление. Величина этой области зависит от схемы делителя и коэффициента деления. Для делителей с усилителями мощности, содержащих самостоятельные преобразователи, этот диапазон амплитуд остается достаточно широким и при больших коэффициентах деления. Амплитудные характеристики делителей с мультивибраторами, наоборот, характерны узкими пределами допустимых изменений входной амплитуды; если изменения амплитуды выходят за эти пределы, коэффициент деления скачкообразно изменяется.

Важнейшая характеристика делителя—п р е д е л ы д о п у с т и м ы х и з м е н е н и й п а р а м е т р о в устройства, при которых процесс деления еще не срывается. Изменения параметров резонансных контуров, емкостей и сопротивлений, входящих в цепь *RC* (в мультивибраторах и *RC*-генераторах), смена ламп— все это может привести к срыву деления. Чем больше пределы изменения какого-либо параметра, соответствующие устойчивому делению, тем выше эксплуатационные качества делителя, тем надежнее он работает и тем легче требования к стабильности и точности применяемых деталей.

С этой точки зрения при выборе схемы делителя предпочтение должно быть отдано делителю с усилителем и двумя самостоятельными преобразователями, дающему хорошие результаты даже при больших коэффициентах деления. Кроме того, следует отметить делители с *RC*-генераторами синусоидальных колебаний, обеспечивающие устойчивость процесса деления при довольно больших отклонениях емкостей (коэффициент деления при этом может быть порядка 5—10). Делители с мультивибраторами, *LC*-генераторами, а также с усилителями, не содержащие отдельных преобразователей, как правило, значительно усту-

пают делителю с усилителем и самостоятельными преобразователями. Нужно, однако, иметь в виду, что устойчивость процесса деления при изменении параметров определяется не только объективными свойствами устройства, но и тщательностью его проектирования, изготовления и настройки. Поэтому вполне возможны случаи, когда делитель, процесс деления в котором принципиально менее устойчив (например, делитель с мультивибратором), окажется более надежным, чем делитель с кольцевым преобразователем и усилителем, если он недостаточно хорошо сконструирован и налажен.

Пределы изменения питающих напряжений, при которых делитель продолжает устойчиво работать,— также важнейшая характеристика делителя. Если эти пределы невелики, то деление будет неустойчивым и тогда возникнет необходимость стабилизации питающих напряжений. Наибольшей устойчивостью в этом отношении обладает делитель с усилителем и кольцевым преобразователем. Некоторые делители, собранные по этой схеме, работают совершенно устойчиво даже при двукратных изменениях питающих напряжений. В то же время допустимые пределы колебания напряжений для хорошо налаженных делителей с мультивибраторами и *LC*-генераторами, как правило, составляют 15—20%.

Существенным показателем делителя является форма кривой напряжения на его выходе. Если делитель должен давать синусоидальные колебания деленной частоты, то применяются устройства с усилителями и самостоятельными преобразователями, с *LC*- и *RC*-генераторами синусоидальных колебаний. При больших коэффициентах деления лучшие результаты с точки зрения близости формы напряжения к синусоидальной дает делитель с кольцевым преобразователем. При небольших коэффициентах деления хорошую форму обеспечивают и более простые делители (например, с *LC*-генераторами). Следует иметь в виду, что форма колебаний на выходе устройства при заданном коэффициенте деления сильно зависит от амплитуды подводимого напряжения. Иногда (например, в некоторых делителях с усилителями) удовлетворительную форму напряжения на выходе можно получить лишь при довольно больших входных напряжениях (порядка нескольких десятков вольт).

В тех случаях, когда с выхода делителя нужно снять

напряжение многих гармоник поделенной частоты, чаще всего применяют схемы с мультивибраторами.

В заключение упомянем о конструктивных особенностях делителей. Если говорить о делителях с большим коэффициентом деления, то наиболее простыми в конструктивном отношении являются устройства с *LC*- и *RC*-генераторами, а также с усилителями, не имеющие самостоятельных преобразователей. Делители, в которых имеются два преобразователя (смеситель и умножитель), значительно сложнее. В тех случаях, когда к делителю не предъявляется особенно высоких требований и когда он должен быть максимально простым, вполне оправдано использование схем с генераторами. Наоборот, в ответственной аппаратуре следует применять делители с усилителями и самостоятельными преобразователями.

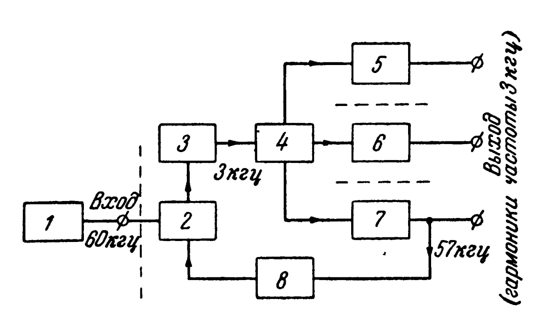
ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЛИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Делители в схемах стабилизации частоты

Основное применение делители находят в схемах, предназначенных для получения колебаний относительно низких и очень стабильных частот. Применения их весьма многочисленны. Например, в некоторых конструкциях кварцевых часов требуется получить колебания чрезвычайно стабильной частоты 50 *гц*, используемые для вращения синхронного электродвигателя. Частота эта получается с помощью деления частоты колебаний высококачественного кварцевого генератора.

Делители частоты находят применение в устройствах, служащих для получения колебаний целого ряда частот одинаково высокой стабильности. В качестве примера можно сослаться на стандарты частоты, предназначенные для выполнения особо тонких и ответственных измерений и градуировок точной аппаратуры. Некоторые из таких приборов обеспечивают стабильность частоты порядка 10^{-7} и более высокую. Необходимость в получении серии высокостабильных частот возникает иногда и в радиолокационной аппаратуре (например, в дальномерах). В многоканальных системах высокочастотного телефонирования по проводам устройства такого рода создают колебания ряда несущих частот, необходимых для осуществления многоканальной передачи.

Во всех этих схемах обычно имеется лишь один кварцевый генератор и, следовательно, стабилизирована лишь одна частота. Остальные получаются из этой исходной частоты посредством ее умножения и деления. Образовавшиеся гармоники и субгармоники первоначальной частоты можно в свою очередь подвергнуть различным преобразованиям и получить довольно густую сетку стабильных частот. Таким образом, вся установка распадается на две части: кварцевый генератор и преобразующее устройство, с выхода которого снимаются напряжения различных частот.



Фиг. 16. Блок-схема устройства, позволяющего получить напряжения гармоник частоты 3 *кгц* высокой стабильности.

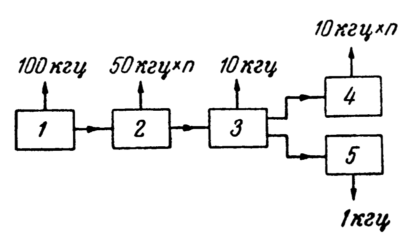
1 — кварцевый генератор на частоту 60 *кгц*; *2* — преобразователь частоты; *3* — синхронизируемый возбужденный генератор на частоту 3 *кгц* (низкой стабильности); *4* — умножитель частоты; *5* — фильтр на частоту 6 *кгц*; *6* — фильтр на частоту 21 *кгц*; *7*—фильтр на частоту 57 *кгц*; *8* — усилитель.

Фиг. 16 иллюстрирует построение систем, генерирующих ряд синусоидальных колебаний различных частот. На ней изображена блок-схема устройства, создающего колебания частоты 3 *кгц* и ее гармоник. Устройство представляет собой делитель частоты с возбужденным генератором; его характерной особенностью является наличие умножителя, позволяющего, во-первых, использовать в преобразователе комбинацию второго порядка, а, во-вторых, получить гармоники частоты 3 *кгц*.

Ко входу делителя подводится напряжение с частотой 60 *кгц*, получаемое от кварцевого генератора. Кроме того, на преобразователь частоты, входящий в делитель, воздействуют колебания частоты 57 *кгц*, являющейся девятнадцатой гармоникой частоты основного синхронизируемого

генератора 3 *кгц*. Помимо девятнадцатой гармоники, необходимой для деления в 20 раз (60/20 = 3), в результате умножения образуются и другие гармоники, напряжения которых поступают через соответствующие фильтры на выход устройства.

Чаще приборы, служащие для получения колебаний ряда стабильных частот, состоят из нескольких делителей и умножителей. На фиг. 17 представлена блок-схема калибратора частоты, дающего эталонные частоты 100, 50, 10 и 1 *кгц* и гармоники частоты 10 *кгц* в диапазоне до 30 *мггц* [1].



Фиг. 17. Блок-схема калибратора частоты.

1—кварцевый генератор на частоту 100 *кгц*; *2* — делитель частоты с мультивибратором (коэффициент деления равен двум); *3* — делитель частоты с возбужденным генератором (коэффициент деления равен пяти); *4* — импульсный генератор на частоту 10 *кгц*; *5* — делитель частоты с возбужденным генератором (коэффициент деления равен десяти).

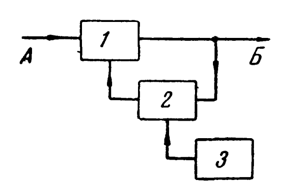
Погрешность частот калибратора не превышает $5 \cdot 10^{-6}$. Основным звеном калибратора, обусловливающим погрешность получаемых частот, является стабилизированный кварцем генератор, частота колебаний которого равна 100 *кгц*. Эта частота делится в 2 раза делителем с мультивибратором. Благодаря несинусоидальности формы колебаний мультивибратора с его выхода снимаются колебания не только частоты 50 *кгц*, но и гармоник этой частоты. Следующий делитель делит частоту в 5 раз и содержит синусоидальный генератор. С выхода этого делителя отбирается напряжение эталонной частоты 10 *кгц*. Напряжение этой частоты, кроме того, поступает, во-первых, на генератор импульсов частоты 10 *кгц* и, во-вторых, на следующий делитель, уменьшающий эту частоту в 10 раз (схема его приведена на фиг. 10). Форма импульсов выбрана такой, что на выходе импульсного генератора действуют напряжения большого числа гармоник, заполняющих полосу до частот порядка 30 *мггц*. Напряжения гармоник достаточно велики для того, чтобы их можно было легко выделить приемником.

[1] «Вестник связи», 1954, № 1.

Делители в технике частотной модуляции

В технике частотной модуляции оказалось ценным свойство делителя уменьшать отклонения частоты от некоторого значения.

Среди колебаний, излучаемых ЧМ-передатчиком, содержится и колебание так называемой «средней» частоты. Это — та частота, колебания которой создает модулируемый генератор, когда модуляция отсутствует. К стабильности этой частоты предъявляются довольно жесткие требования. Например, для радиовещательных ЧМ-передатчиков она должна быть не меньше $2 \cdot 10^{-5}$. Достигнуть такой стабильности в передатчиках, в которых частотная модуляция осуществляется непосредственно изменением частоты задающего генератора, удается лишь при помощи специальных устройств автоподстройки частоты. Именно в них и применяются делители.



Фиг. 18. Блок-схема системы автоподстройки частоты.

1—частотно-модулированный генератор; *2*— сравнивающее устройство; *3* — генератор с кварцем; *А* — от источника напряжения низкой частоты; *Б* — к усилителям и умножителям частоты.

Упрощенная блок-схема ЧМ-передатчика с таким устройством приведена на фиг. 18. В нем имеются два генератора: один из них, кварцевый генератор *3*, служит лишь для стабилизации средней частоты передатчика, а частота другого генератора *1* изменяется под воздействием модулирующего напряжения низкой частоты. Сравнивающее устройство *2* и кварцевый генератор *3* образуют тракт автоподстройки средней частоты.

Назначение сравнивающего устройства — сравнить частоту кварцевого генератора с менее стабильной средней частотой модулированного генератора. Это устройство связано с модулированным генератором *1* таким образом, что оно может изменять его среднюю частоту. Если последняя в точности равна частоте колебаний генератора *3*, то сравнивающее устройство совершенно не воздействует на генератор *1*. Когда же равенство частот нарушается, тракт автоподстройки регулирует частоту генератора *1* до тех пор, пока она с заданной точностью не станет равна частоте кварцевого генератора.

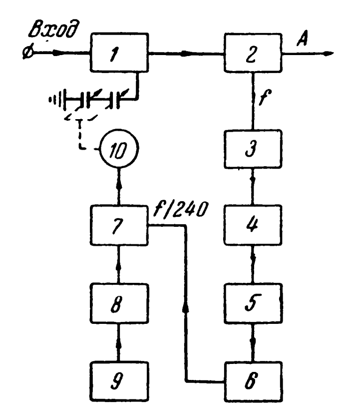
Необходимо указать, что в процессе передачи сложного сигнала амплитуда колебаний средней частоты генератора *1* изменяется, и притом в довольно широких пределах. Объяс-

няется это тем, что при передаче сложного сигнала изменяется величина индекса модуляции (равного отношению частотного отклонения к частоте модуляции). Но амплитуда колебаний средней частоты зависит от индекса модуляции и, следовательно, представляет собой величину, изменяющуюся в процессе передачи. Поэтому колебания средней частоты, которые поступают в сравнивающее устройство при передаче реального сигнала, непрерывно изменяются по амплитуде. Следствием этого являются два обстоятельства. Во-первых, в системе возможно возникновение паразитной частотной модуляции (сравнивающее устройство может изменить частоту модулируемого генератора из-за того, что изменится амплитуда колебания средней частоты). Во-вторых, в устройствах, где напряжение, снимаемое с выхода сравнивающего устройства, используется для вращения электродвигателя, вал которого связан с конденсаторами генератора *1* (изменение емкости этих конденсаторов и управляет средней частотой генератора), изменение амплитуды напряжения средней частоты может привести к уменьшению вращающего момента двигателя.

Для устранения этих недостатков нужно стабилизировать амплитуду колебания средней частоты. Этого можно добиться, уменьшив отклонение частоты генератора *1* от среднего значения, что приведет к уменьшению отклонения индекса модуляции. Если же в процессе передачи сигнала это отклонение будет оставаться достаточно малым, то будут малыми и изменения амплитуды колебания средней частоты. Именно для уменьшения отклонения частоты модулированного генератора и используются делители. Они включаются между генератором *1* и сравнивающим устройством схемы фиг. 18, так что отклонения частоты колебания на входе сравнивающего устройства (т. е. на выходе делителя) меньше отклонения на выходе генератора *1* (т. е. на входе делителя). Это приводит к стабилизации амплитуды колебания средней частоты на входе сравнивающего устройства и устранению рассмотренных выше недостатков.

Блок-схема возбудителя радиовещательного ЧМ-передатчика с использованием делителей в тракте автоподстройки приведена на фиг. 19. Делители *3*, *4*, *5* и *6* с общим коэффициентом деления 240 применяются для сжатия диапазона отклонения частоты, а делитель *8* служит для понижения частоты кварцевого генератора, как и в рассмотренных схемах стабилизации.

Что касается видов делителей, применяемых в ЧМ-передатчиках, то здесь широко используются мультивибраторы и делители с усилителями мощности.



Фиг. 19. Блок-схема системы автоподстройки частоты с применением делителей.

1—модулятор; 2—модулируемый генератор на 4,5 — 6 *мггц*; 3 — делитель частоты (коэффициент деления равен трем); 4 — делитель частоты (коэффициент деления равен четырем); 5 — делитель частоты (коэффициент деления равен четырем); 6 — делитель частоты (коэффициент деления равен пяти); 7 — сравнивающее устройство; 8—делитель частоты (коэффициент деления равен пяти); 9 — кварцевый генератор; 10 — электродвигатель; А — к усилителям и умножителям частоты.

Делители частоты в качестве фильтров

Делители частоты обладают свойствами, позволяющими использовать их в качестве своеобразных фильтров. Первое из них заключается в следующем. Если на делитель с усилителем мощности длительное время воздействовать напряжением делимой частоты, то амплитуда колебаний поделенной частоты на его выходе не сразу достигает той величины, которую мы обычно считаем мгновенно устанавливающейся и называем амплитудой выходного напряжения; требуется некоторое время для того, чтобы амплитуда эта приблизилась к установившемуся значению. Характер этого нарастания таков, что делитель можно с успехом использовать для отделения хотя бы и интенсивных, но кратковременных помех от более длительных полезных сигналов (даже в том случае, если они не так велики, как помеха).

Благодаря тому, что колебания поделенной частоты в делителе нарастают сначала очень медленно, а потом быстрее, даже сильные кратковременные помехи не успевают создать значительных напряжений поделенной частоты, в то время как полезному сигналу (который должен быть, конечно, более длительным, чем помеха) удается вызвать интенсивные колебания.

Еще одно свойство делителя дает возможность сравнительно успешно применять его в качестве помехоподавляющего устройства. Мы уже говорили, что, для того чтобы возбудить колебания поделенной частоты, амплитуда входного напряжения должна лежать в определенных пределах:

она не должна быть ни слишком малой, ни слишком большой. Вследствие этого даже длительные помехи, если только они малы или, наоборот, велики по своей величине, будут «отсеяны» делителем.

Как показали испытания таких фильтров (названных их изобретателями — академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси — автопараметрическими), они позволяют в значительной степени подавить даже интенсивные одиночные импульсные помехи при телеграфном приеме.

СОДЕРЖАНИЕ

К ЧИТАТЕЛЯМ

Выпуски Массовой радиобиблиотеки служат важному делу пропаганды радиотехнических знаний среди широких слоев населения нашей страны, и способствуют развитию радиолюбительства. В свете этих задач большое значение имеет привлечение радиолюбительской общественности к критике каждой вышедшей книги и брошюры.

Редакция Массовой радиобиблиотеки обращается к читателям данной книги с просьбой прислать свои отзывы, пожелания и замечания вместе с краткими сообщениями о своем образовании, профессии, возрасте и радиолюбительском опыте по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10—Редакция Массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата.

Цена 90 коп.